

# Эффект самоорганизации ансамбля нанокластеров Ge при импульсном облучении низкоэнергетическими ионами в процессе гетероэпитаксии на Si

А. В. Двуреченский<sup>1)</sup>, В. А. Зиновьев, Ж. В. Смагина

Институт физики полупроводников Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 30 июля 2001 г.

Методом сканирующей туннельной микроскопии экспериментально исследовано распределение по размерам островков Ge, формирующихся в экспериментах двух видов при гетероэпитаксии Ge на Si(111): 1) обычный процесс молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ); 2) импульсное (0.5 с) облучение ионами Ge с энергией  $\simeq 200$  эВ в моменты времени, соответствующие степени заполнения  $> 0.5$  каждого монослоя. Эксперименты выполнялись при температуре  $350^\circ$  С. Обнаружено, что импульсное облучение пучком ионов в процессе гетероэпитаксии приводит к уменьшению среднего размера островков Ge, увеличению их плотности и уменьшению среднеквадратичного отклонения от среднего значения по сравнению с аналогичными величинами в опытах по обычной МЛЭ.

PACS: 61.14.Hg, 61.80.-x, 68.55.-a

Наиболее перспективный метод создания ансамблей квантовых точек основан на эффектах самоорганизации полупроводниковых наноструктур в процессе гетероэпитаксии [1–6]. В настоящее время считается общепринятым, что ключевым фактором перехода от двумерно-слоевого (2D) к трехмерному островковому (3D) росту псевдоморфных пленок при гетероэпитаксии является энергетический выигрыш из-за уменьшения напряжений в 3D островках путем их упругой релаксации в вершинах выступов. Образование островков является проявлением морфологической неустойчивости напряженных пленок и обычно наблюдается в системах с большим рассогласованием параметров решетки пленки и подложки (больше 2%), типичными представителями которых являются Ge/Si (4%) и InAs/GaAs (7%).

Эффекты самоорганизации (упорядочения) заключаются в появлении в системе островков предпочтительных значений их характеристик: размеров, формы, расстояний между нанокластерами и их взаимного расположения. Происходящие процессы упорядочения связаны с минимизацией суммарной свободной энергии системы. Распределению островков по размерам уделяется особое внимание, так как этот параметр системы квантовых точек чрезвычайно важен для практических применений.

Среди возможных путей улучшения однородности по размерам островков обычно выделяют следующие: а) использование отклоненных от сингуляр-

ной плоскости поверхности подложки ([7] и ссылки в ней); б) синхронизация зарождения [8].

Считается, что 3D островки зарождаются на несовершенствах 2D слоя (гетерогенный механизм зарождения), следовательно, предварительное создание мест для зарождения кластеров является эффективным путем управления их упорядочением.

Метод синхронизации зародышеобразования основан на идее изменения пересыщения адатомов путем кратковременного увеличения плотности молекулярного пучка или кратковременного понижения температуры подложки. Циклическое изменение пересыщения во время роста каждого атомного слоя представляет основу оптимизированного метода создания квантово-размерных структур.

Недавно было обнаружено, что облучение низкоэнергетическими ионами Ge в процессе гетероэпитаксии Ge на кремнии приводит к стимулированному зарождению островков Ge и уменьшению критической толщины псевдоморфной пленки Ge, при которой происходит 2D  $\rightarrow$  3D переход [9].

Цель настоящей работы заключается в исследовании процесса формирования и эффектов самоорганизации ансамбля островков Ge при кратковременном облучении псевдоморфной пленки Ge собственными ионами в процессе гетероэпитаксии на Si(111) из молекулярных пучков. Грань (111) обеспечивает наибольшую устойчивость по отношению к морфологической нестабильности, приводящей к образованию 3D островков на поверхности псевдоморфной пленки в процессе обычной эпитаксии. Именно поэтому для

<sup>1)</sup>e-mail: dvurech@isp.nsc.ru

выявления эффектов ионного воздействия была выбрана поверхность с ориентацией (111).

Эксперименты проводились в сверхвысоковакуумной камере установки МЛЭ, оснащенной электронно-лучевым испарителем (ЭЛИ) для Si и эффузионной ячейкой (тигель из нитрид бора) для Ge. Над тиглем располагалась разработанная и изготовленная нами система ионизации и ускорения ионов германия. Ионизация молекулярного потока Ge осуществлялась поперечным пучком электронов. Устройство ионизации позволяет изменять долю ионизации молекулярного пучка Ge в системе от 0.1% до 0.5%. Блок импульсной подачи ускоряющего напряжения позволял создавать импульсы ионного тока длительностью 0.5–1 с при энергии ионов 50–200 эВ. Угол падения молекулярного и ионного пучков на подложку составлял  $54.5^\circ$ . Аналитическая часть камеры включала дифрактометр быстрых электронов на отражение с энергией 20 кэВ. В процессе роста пленки германия регистрировалась картина дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на цифровую видеокамеру с последующим вводом данных в компьютер и их обработкой на базе разработанного программного обеспечения.

Скорость роста пленки германия составляла  $\sim 1$  бислоя (БС) за 10 с ( $1 \text{ БС} = 1.56 \cdot 10^{15} \text{ ат./см}^2$ ), температура подложки варьировалась в диапазоне  $200\text{--}400^\circ\text{C}$ . В качестве подложек использовались пластины Si (111) с углом разориентации менее  $14'$ . Перед ростом пленки Ge проводился высокотемпературный отжиг пластины с последующим наращиванием буферного слоя Si. При гетероэпитаксии Ge на Si(111) проводились эксперименты двух видов: 1) обычный процесс молекулярно-лучевой эпитаксии; 2) молекулярно-лучевая эпитаксия с импульсным (0.5 с) облучением ионами Ge с энергией 200 эВ в моменты времени, соответствующие степени заполнения  $\geq 0.8$  каждого бислоя. Общее количество осажденного Ge для обоих типов экспериментов было одинаковым.

Морфология поверхности исследовалась *ex situ* с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), которая позволяла получить прямое изображение рельефа поверхности в реальном пространстве с атомным разрешением. Исследования образцов проводились при комнатной температуре в режиме постоянного туннельного тока (напряжение 2 В, ток 0.085–0.7 нА, обратная связь 3.76 – 5.31%). СТМ-снимки обрабатывались с использованием специальной программы, позволяющей определить распределение островков по размеру и их плотность.

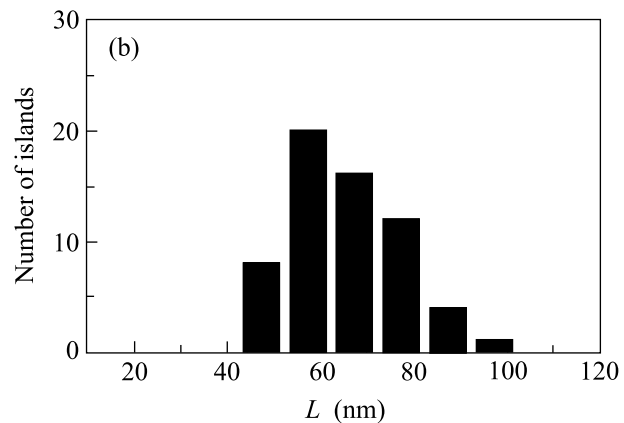


Рис.1. а) Снимок участка поверхности  $1000 \times 1000$  нм, полученного *ex situ* методом сканирующей туннельной микроскопии после гетероэпитаксии Ge на Si(111) при температуре  $350^\circ\text{C}$  (осаждено 5 бислоев); б) распределение островков Ge по размеру

Результаты экспериментов, приведенных на рис.1, 2, получены при плотности потока Ge  $2.1 \cdot 10^{14} \text{ ат./см}^2\text{с}$ , плотности ионного тока  $5.5 \cdot 10^{11} \text{ ат./см}^2\text{с}$ , температуре подложки  $350^\circ\text{C}$ . Количество осажденного Ge составляло 5 БС.

В экспериментах первого вида плотность островков Ge оказалась равной  $7.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , средний размер  $L = 63 \pm 9$  нм (неоднородность по размеру 14%), см. рис.1. В экспериментах второго типа обнаружено увеличение плотности островков приблизительно в два раза ( $1.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), уменьшение их среднего размера и разброса по размерам ( $L = 43 \pm 4$  нм, 9%, рис.2). Уменьшение ширины на полувысоте функции распределения островков по размеру свидетельству-

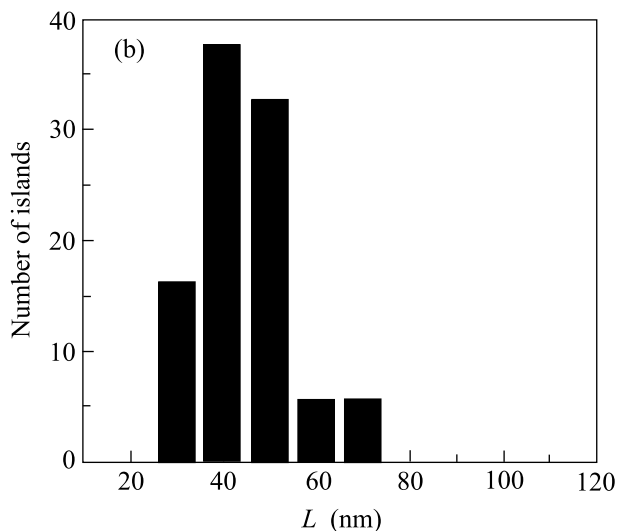


Рис. 2. То же, что на рис.1 в условиях импульсного (0.5 с) облучения низкоэнергетическими (200 эВ) ионами  $Ge^+$  в процессе гетероэпитаксии

ет об упорядочении ансамбля нанокластеров Ge по размеру, причем процесс упорядочения является результатом облучения псевдоморфной пленки Ge низкоэнергетическими ионами.

Представляет интерес привести некоторые оценки, характеризующие процесс ионно-стимулированного зарождения и роста островков Ge. Прежде всего, нужно отметить, что интегральный поток ионов Ge (полная доза облучения) составил  $\Phi = 0.5 \cdot 5 \cdot 5.5 \cdot 10^{11} \approx 1.4 \cdot 10^{12}$  ат./см<sup>2</sup>. Каждый удар ускоренного иона Ge приводит к образованию  $\sim 10$  адатомов за счет выбивания атомов из регулярных позиций в ближайших от поверхности 1-2 монослоях псевдоморфной пленки

Ge. На месте выбитых атомов на поверхности растущего слоя формируется вакансионный кластер (кластер моноатомной толщины) [10, 11]. Величина  $\Phi$  практически на два порядка превышает экспериментально полученное значение плотности островков Ge. Следовательно, для выбранных условий эксперимента большинство введенных ионным облучением вакансионных образований на поверхности слоя Ge заглаживается (отжигается) в результате взаимодействия с адатомами, поступающими из молекулярного потока, а также генерируемыми облучением. Лишь малая часть вакансионных кластеров служит, по-видимому, местами зарождения островков Ge. Не исключено, что в экспериментах второго вида при выбранном количестве осажденного Ge существует определенный вклад в образование островков по механизму Странского – Крастанова.

Эксперименты, выполненные при меньших значениях количества осажденного Ge дают основания полагать, что вклад процесса ионно-стимулированного образования островков Ge в экспериментах второго вида является определяющим. Так, после наращивания 3.5 БС в условиях обычной гетероэпитаксии Ge на Si(111) островки Ge практически не наблюдаются (толщина слоя Ge меньше критической). Включение импульсного облучения в процессе гетероэпитаксии (эксперименты второго вида) приводит к образованию островков с плотностью  $4.3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

Процесс упорядочения островков Ge по размеру связан, по-видимому, со следующими факторами: а) одномоментное (в пределах длительности импульса) зарождение островков Ge после завершения роста каждого слоя и последующее разращивание островков; б) уменьшение шероховатости растущего слоя при импульсном воздействии пучком ионов  $Ge^+$  с энергией около 200 эВ перед максимумом ростовой осцилляции [9], что, по-видимому, обусловлено увеличением коэффициента диффузии адатомов в результате ионно-стимулированной реконструкции поверхности Ge(111): переход от сверхструктуры (7×7) к (5×5).

Авторы выражают благодарность В. А. Кудрявцеву за проведение экспериментов по гетероэпитаксии и С. А. Тийсу, И. Г. Кожемяко за измерения на сканирующем туннельном микроскопе.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 99-02-17196 и программы “Поверхностные атомные структуры”, проект # 4.2.99.

1. Ж. И. Алферов, ФТП **32**, 317 (1998).

2. Н. Н. Леденцов, В. М. Устинов, В. А. Шукин и др., ФТП **32**, 385 (1998).
3. А. В. Двуреченский, А. И. Якимов, Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники **4**, 4 (1999).
4. О. Р. Pchelyakov, Yu. B. Bolkhovityanov, A. V. Dvurechenskii et al., Thin Solid Films, **367**, 75 (2000).
5. О. П. Пчеляков, Ю. Б. Болховитянов, А. В. Двуреченский и др., ФТП, **34**, 1281 (2000).
6. А. В. Двуреченский, А. И. Якимов, Известия РАН, серия физ. **65**, 306 (2000).
7. Y. Kim, B. D. Min, and E. K. Kim, J. Appl. Phys. **85**, 2140 (1999).
8. V. A. Markov, O. P. Pchelyakov, L. V. Sokolov et al., Surf. Sci. **250**, 229 (1991).
9. А. В. Двуреченский, В. А. Зиновьев, В. А. Кудрявцев, Ж. В. Смагина, Письма в ЖЭТФ **72**, 190 (2000).
10. А. В. Двуреченский, В. А. Зиновьев, В. А. Марков, ЖЭТФ **114**, 2055 (1998).
11. A. V. Dvurechenskii, V. A. Zinovyev, V. A. Markov, and V. A. Kudryavtsev, Surf. Sci. **425**, 185 (1999).